

# 수치해석 기법을 통한 사용후 핵연료 수송용기 완충재질의 충격특성 평가

## Evaluation of Impact Characteristics of Absorber Materials for Spent Fuel Shipping Cask using Numerical Analysis

\*강승구<sup>1</sup>, #신광복<sup>2</sup>, 구준성<sup>1</sup>, 최우석<sup>3</sup>

\*S. G. Kang<sup>1</sup>, #K. B. Shin(shin955@hanbat.ac.kr)<sup>2</sup>, J. S. Goo<sup>1</sup>, W. S. Choi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>국립한밭대학교 기계설계공학과, <sup>2</sup>국립한밭대학교 기계공학과, <sup>3</sup>한국원자력연구원

Key words : Balsa-Wood, Impact analysis, Impact limiter, Spent fuel shipping cask, Urethane-Foam

### 1. 서론

최근 화석연료의 고갈에 따른 대체에너지로 원자력 발전의 비중이 증가되고 있는 추세이다. 그러나 원자력 에너지의 사용에 따라 강한 방사선과 높은 열을 방출시키는 고준위 방사선 물질인 사용후 핵연료가 발생된다. 이에, 사용후 핵연료의 운반 및 보관에 대한 안전성 확보가 필요한 실정이다. 사용후 핵연료 수송용기는 국제원자력기구의 안전규정에 의거하여 정상사고조건과 가상사고조건에 대한 안전성을 확보하도록 요구되고 있다[1].

이러한 사고조건 시험중 낙하시험은 운반환경에서 발생할 수 있는 다양한 낙하방향을 고려한 시험이 수행하여야 한다[2, 3]. 그러나 낙하시험의 경우 5가지 방향에 대해 충격완충체를 장착하여 시험이 수행되기 때문에 시험에 필요한 모델 제작시 시간 및 금전적 손실이 크게 발생하고 있다. 따라서 다양한 완충재질에 대한 설계의 타당성을 우선적으로 검증할 수 있는 해석적 모델을 도출해야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 사용후 핵연료 수송용기 완충재질의 충격특성을 평가하기 위해 각각의 완충재질에 대한 저속충격시험을 수행하였으며, 수치해석 기법을 통해 저속충격시험 결과와 상호비교분석을 수행하여 신뢰도 높은 유효모델을 도출하였다.

### 2. 완충재질에 따른 저속충격시험

저속충격 시험편은 ASTM 규정에 의거하여 제작되었다. 시험은 인스트론(Instron)사의 Dynatup 8250을 사용하여 1J, 3J 그리고 5J의 충격 에너지에서 시험을 진행하였다. 이방성 재질인 발사목의 경우 세 가지 방향(z, r,  $\theta$ )에 대한 충격시험을

수행하였으며, 등방성 재질인 우레탄폼은 단일방향에 대한 시험을 수행하였다. Fig. 1은 저속충격시험에 사용된 장비와 시험형상을 나타낸다.

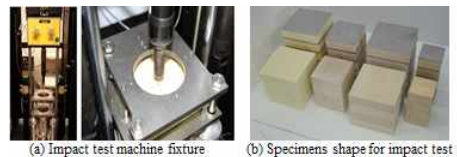


Fig. 1 Impact test machine and specimens

### 3. 충격특성 평가를 위한 유한요소 모델링

충격해석은 재료의 비탄성 변형을 고려할 수 있는 비선형 유한요소 해석프로그램인 LS-DYNA 3D를 이용하였다.

이방성 재료인 발사목은 MAT\_143 WOOD를 적용하였으며, 등방성 재질인 우레탄폼과 샌드위치 패널의 면재는 MAT\_165 PLASTIC NONLINEAR KINEMATIC을 적용하였다.

샌드위치 패널의 유한요소 모델은 면재와 심재에 솔리드 요소를 사용하였으며, 기본물성 시험을 통해 도출된 각 방향별 물성정보를 적용하여 유한요소 모델링을 하였다[4]. Fig. 2는 충격특성 평가를 위한 유한요소모델을 나타내고 있다.

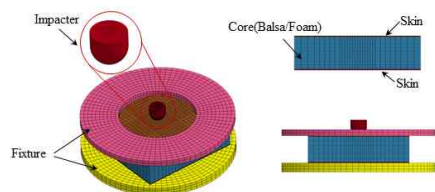


Fig. 2 Finite element models for impact analysis

### 4. 수치해석을 통한 유한요소모델 검증

충격해석은 실제 시험과 동일한 조건에 대하여 평가하기 위해 시험과 동일한 충격에너지(1J, 3J, 그리고 5J)가 부과되도록 하였다. 경계조건은 바닥 고정 지그와 상부 지그를 모델링하여 접촉조건을 부여하였으며 실제 시험환경과 동일하게 적용하였다. 충격체와 면체는 표면 접촉 알고리즘(surface contact algorithm)인 면 대 면(surface to surface) 접촉 조건을 사용하였다. Fig. 3은 충격에너지별 시험과 해석의 하중이력선도를 나타내고 있다.

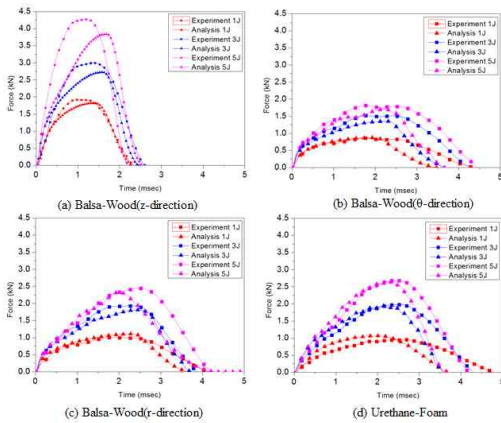


Fig. 3 Time-force histories for various impact energy levels

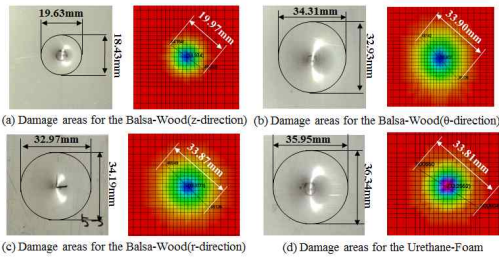


Fig. 4 Comparisons with the experimental and numerical results for damage areas at 5J

Fig. 4는 5J에 대한 시험과 해석 충격손상영역을 나타낸다. 각각의 충격에너지에 대한 해석결과, 발사목의 경우 최대 13%(3J 나이테수직방향)의 오차가 발생하였으며, 우레탄 폼 은 최대 8%(1J)의 오차를 나타냈다. 이때, 발사목의 경우 보다 높은 오차범위가 발생하였으나 이방성 재료와 시험편 별로 나이테의 기준이 다르기 때문에 높게 발생하

는 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 수치해석적 기법을 적용하여 사용후 핵연료 수송용기 충격완충체의 완충재질로 고려되고 있는 발사목과 우레탄폼에 대한 충격해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 유한요소모델은 재료의 기본물성시험을 통해 도출된 물성을 적용하였으며, 시험과 동일한 경계조건을 고려하여 모델링하였다.
- (2) 발사목과 우레탄 폼의 충격해석결과, 충격에너지 레벨에 따른 해석 및 시험결과가 10%이내의 오차범위를 보여 비교적 잘 일치함을 확인하였으며, 각각의 완충재질에 대한 기본물성시험 결과가 타당함을 확인하였다.
- (3) 도출된 표준유한요소모델은 향후 사용후핵연료 수송용기의 낙하사고조건을 모사할 수 있을 것으로 판단되며, 재료의 특성을 고려한 설계의 신뢰성을 입증할 수 있는 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

### 후기

본 연구는 한국원자력연구원에서 수행중인 ‘방사성 폐기물 관리기술 개발사업’의 지원으로 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 정성환, 구정희, 강희영, 이영신, “수송용기의 수평낙하충격에 관한 연구”, 대한기계학회 춘추학술대회, **2**, 441-445, 1994.
2. 이영신, 김용재, “낙하충격하중을 받는 방사성 물질 수송용기의 동적거동에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집, **18**, 2805-2816, 1994.
3. 구정희, 서기석, 민덕기, 김영진, “수송용기 충격완충체 케이스 용접 접합부의 파단특성이 충격흡수거동에 미치는 영향”, 대한기계학회 논문집, **22**, 2286-2295, 1998.
4. 구준성, 신광복, 최우석, “사용후 핵연료 수송용기 충격완충체에 적용되는 발사목과 우레탄 폼 샌드위치 복합재 패널의 저속충격특성 평가 연구”, 한국복합재료학회 춘계학술대회, 145-146, 2012.